

福島復興・廃炉に貢献する学協会連絡会(ANFURD)
「燃料デブリ取り出しにおける潜在的課題」に関する勉強会

燃料デブリ取り出し技術の現状と 学協会への期待

2018年5月15日(火) 09:10~09:45
@TKP新橋カンファレンスセンター

国際廃炉研究開発機構 副理事長・東京大学名誉教授
新井民夫

tamio-arai@irid.or.jp

この成果は、経済産業省/廃炉汚染水対策事業費補助金の活用により得られたものです。

無断複製・転載禁止 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

2

本日の構成

■ 廃炉措置計画

「デブリ」って何？ PCV内部調査方針 IRIDのロボット開発

■ 燃料デブリ取り出し工法

気中-上アクセス工法 & 横アクセス工法 収納・移送・保管技術

■ 安全要求

デブリ取り出し時の安全要求 横アクセス工法の安全系

■ 廃炉ロボットの課題

IRIDの概要 廃炉技術の構成分野 設計上の課題

■ 学協会への期待

(引用)化学工学会からの「学協会連携への期待」 君に何を期待するか

廃炉措置計画

- 過酷環境：放射性物質のリスク
- 多分野複合技術： 連携作業、人材

社会

- アクセスできる空間や使えるリソースの制約
- 研究開発は国の仕事
- 社会的課題としての廃炉

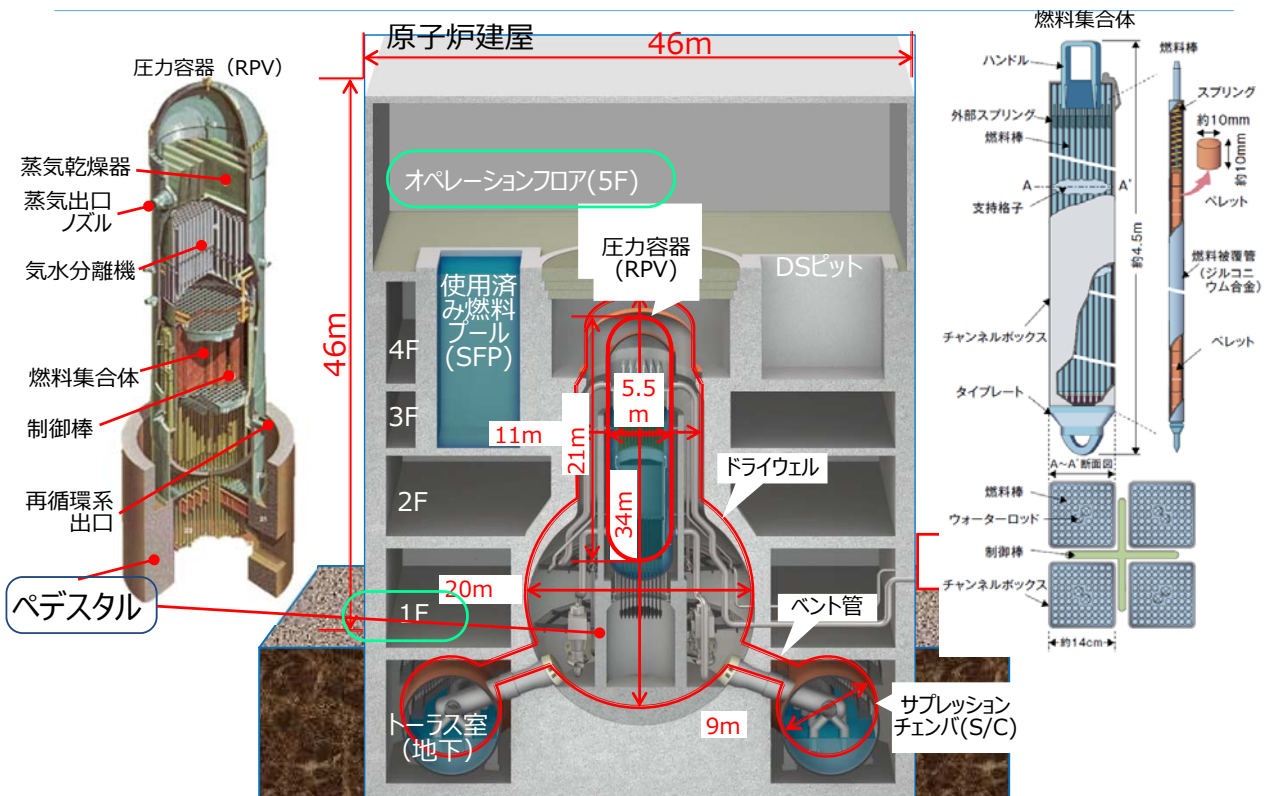
技術

- 実際の内部状況が不明で手探りの状況
- あらゆる事態を想定した対処の検討
- 進捗によって廃炉措置全体の構想の変化

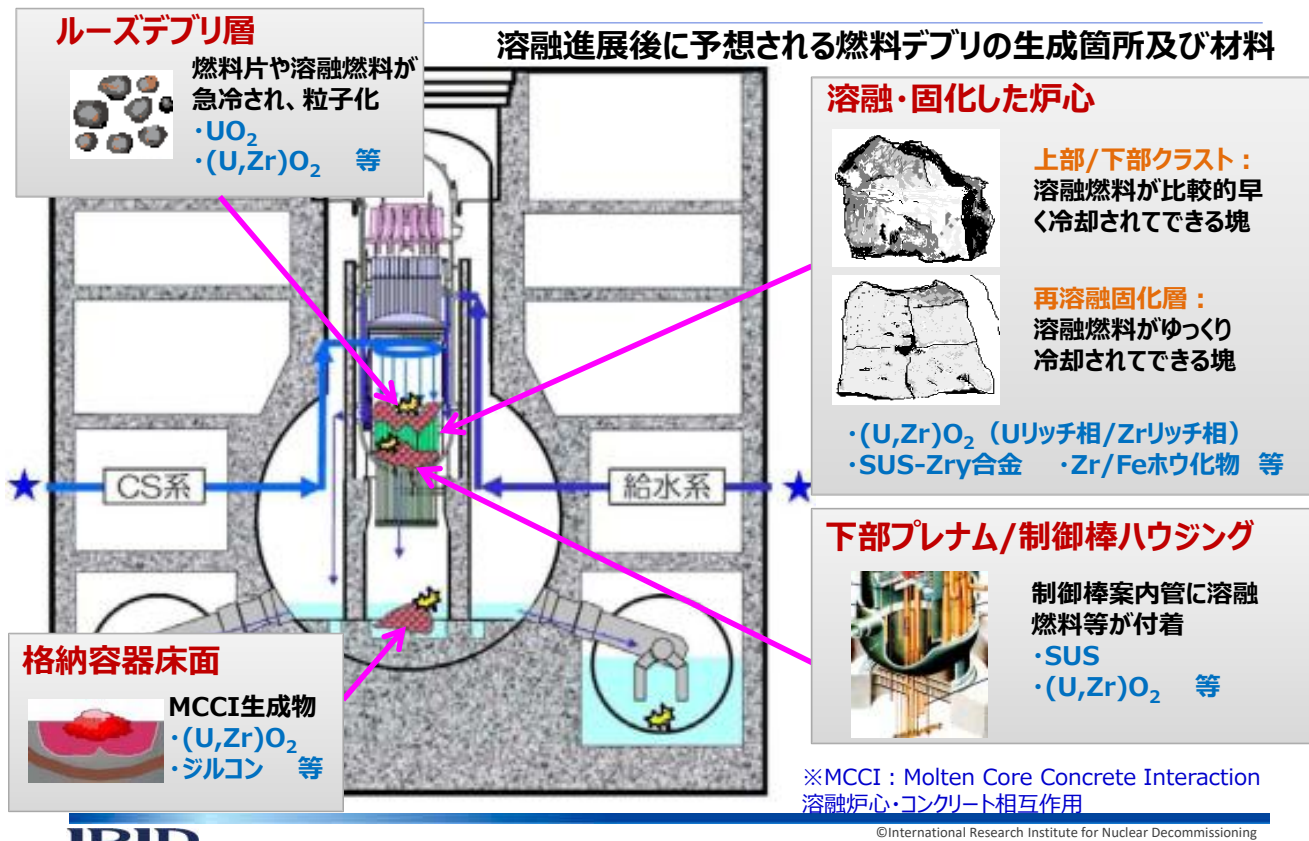


- 未踏分野： 開発の立案と変更
- 長期計画： 人材育成、産業技術化

原子力発電所の構造

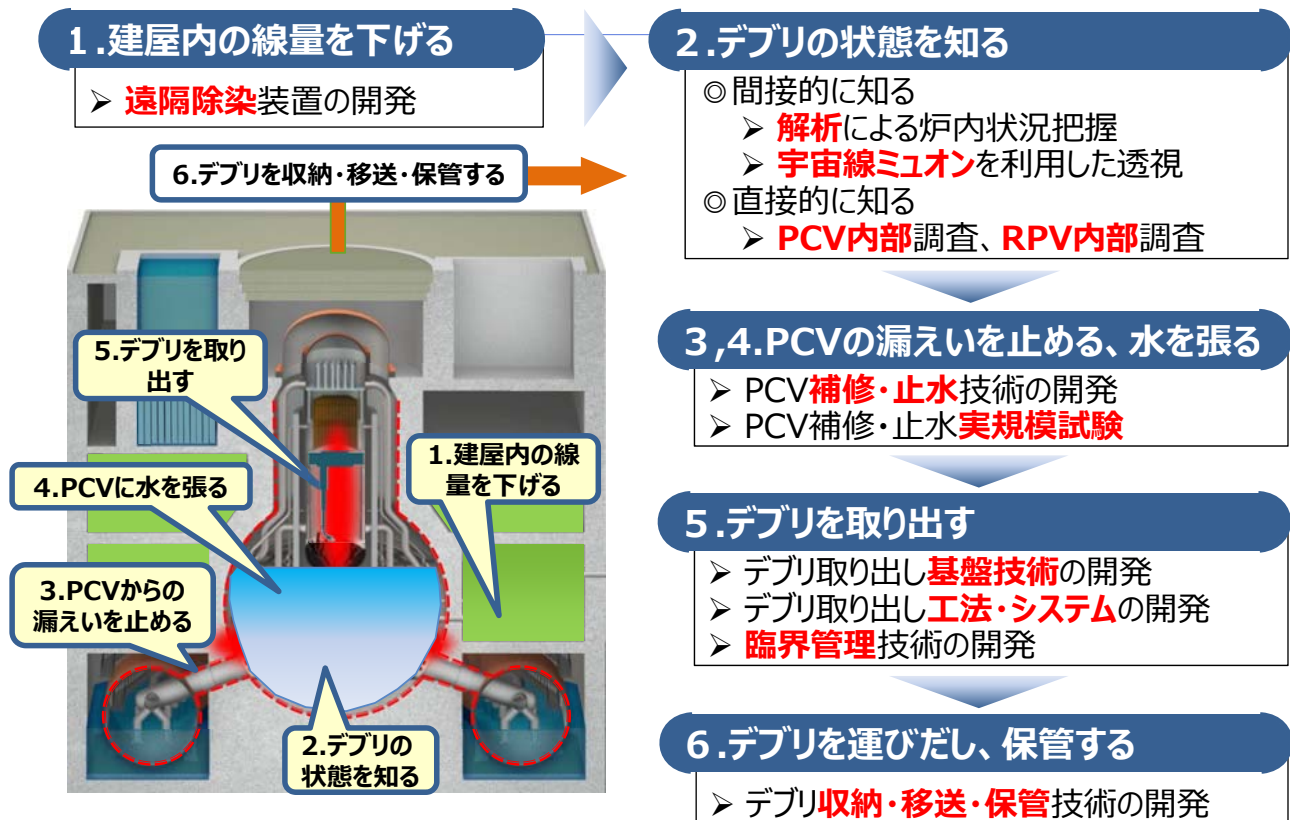


「デブリ」って何？（1F デブリの推定）



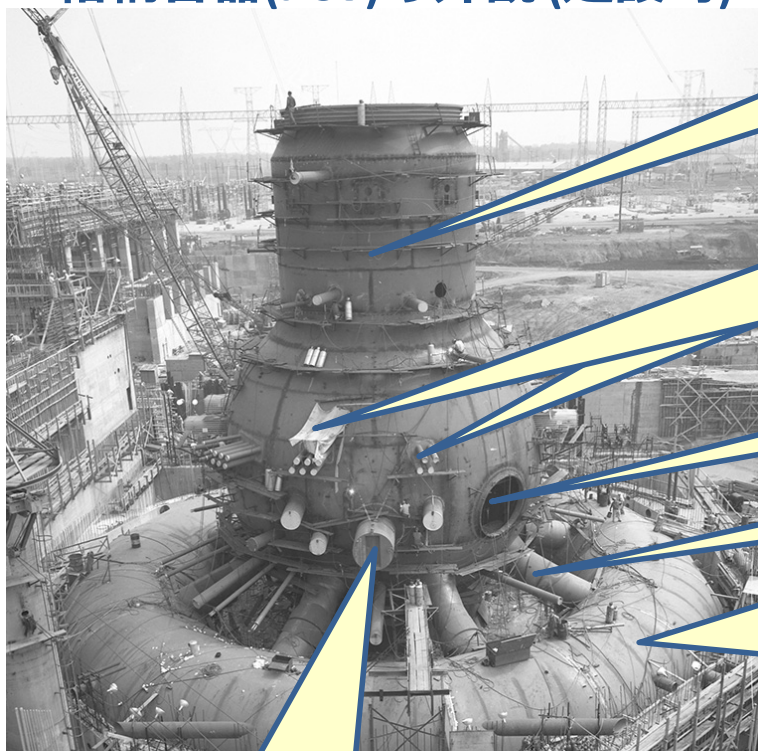
4

IRIDの研究開発プロジェクトとその目的



5

格納容器(PCV)の外観 (建設時)



「ドライウェル (D/W)」: S/Cより上部のPCV

「PCV貫通部」: 配管貫通部、電気配線貫通部等

- 1号機 約150か所
- 2号機 約200か所
- 3号機 約190か所

「機器ハッチ」: 大型機器の搬出入口

「ベント管」: D/WとS/Cの連絡配管

「サプレッションチェンバ (S/C)」: 事故が起きた時に発生した蒸気をS/C内の水で凝縮し、PCVの圧力の上昇を抑える。

「エアロック」: 人の出入口

「Browns Ferry Unit 1 under construction - 1966 Sep」
Tennessee Valley Authority - TVA's 75th Anniversary webpage

燃料デブリ分布の推定

ミュオン測定結果	1号機	2号機	3号機 (速報)
	<ul style="list-style-type: none"> 炉心域に大きな燃料の塊はなし (原子炉圧力容器底部の測定はなし) 	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉圧力容器底部に燃料デブリと考えられる高密度の物質を確認 炉心域にも燃料が一部存在している可能性あり 	<ul style="list-style-type: none"> 現時点での評価では、原子炉圧力容器内部には一部燃料デブリが残存する可能性はあるものの、大きな高密度物質の存在は確認できていない。(継続測定・詳細評価中)

↓ 結果を燃料デブリ分布の推定に反映

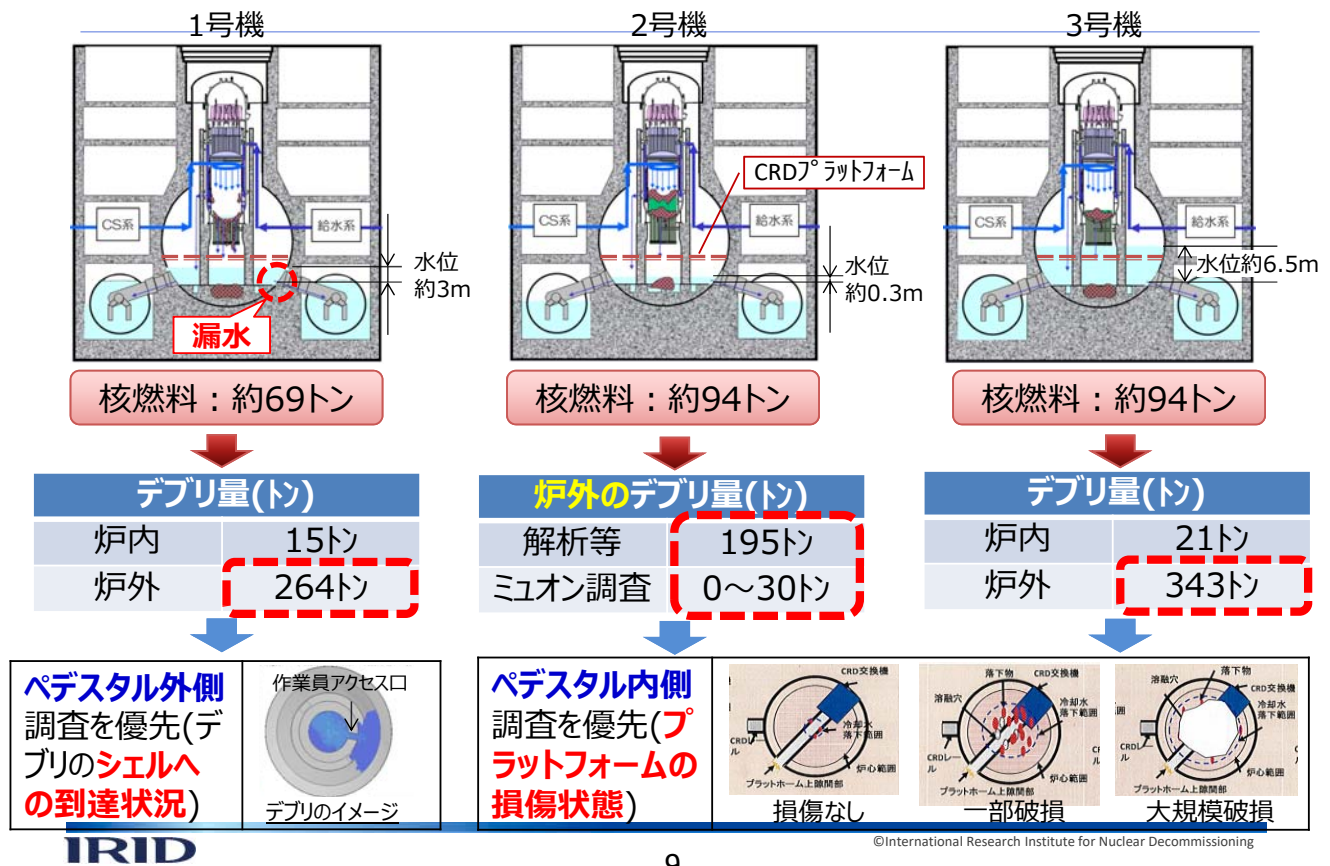
↓ 結果を燃料デブリ分布の推定に反映

↓ 今後、格納容器内部調査やミュオン測定などで得た知見を燃料デブリ分布の推定に反映予定

現状の燃料デブリ分布の推定 (※)	1号機	2号機	3号機
	<p>燃料デブリ分布推定図</p>	<p>燃料デブリ分布推定図</p>	<p>燃料デブリ分布推定図</p>
	<ul style="list-style-type: none"> 溶融した燃料がほぼ全量が格納容器に落下し、元々の炉心部にはほとんど燃料が存在しない 	<ul style="list-style-type: none"> 溶融した燃料のうち、一部は原子炉圧力容器下部プレナム及び格納容器へ落下し、燃料の一部は元々の炉心部に残存 3号機は2号機よりも多くの燃料デブリが格納容器に落下していると推定 	

※ 「廃炉・汚染水対策事業費補助金 (総合的な炉内状況把握の高度化)」(IRID, IAE) 第2回福島第一廃炉国際フォーラム講演資料より抜粋(<http://ndf-forum.com/program/day2.html>, 2017年7月3日) 東京電力HD公表資料から引用

PCV内部調査方針



9

PCV内部のロボットによる調査 (方針)

- 燃料デブリの広がりや格納容器内の損傷状況をさぐる
- 既存のペネトレーション(小口径 直径100mm程度)経由、故に超小型ロボットで通り抜け、中で活動可能に

■ 1号機格納容器内 ペDESTAL外

- グレーチング上を移動し、カメラ付き線量計を水面下に投入して調査

■ 2号機格納容器内 ペDESTAL内

- CRDレールを経由して直接ペDESTAL開口部へ侵入

■ 3号機格納容器内 ペDESTAL内

- 水位が高いため、遊泳ロボットを採用
- 着水後、潜水によりペDESTAL入口から内部へ

A : ペDESTAL内部
 B : ペDESTAL外部
 1 & 2 : 回数

PCV内部のロボットによる調査

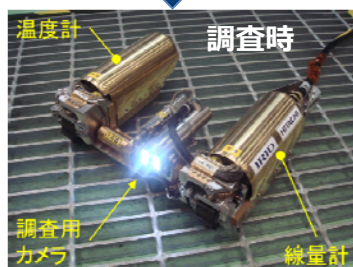
ペDESTル外側の調査（1号機）

○形状変化型ロボット（B2調査）

X-100Bペネ



変形



(注) 上の写真はB1調査時のロボットです。

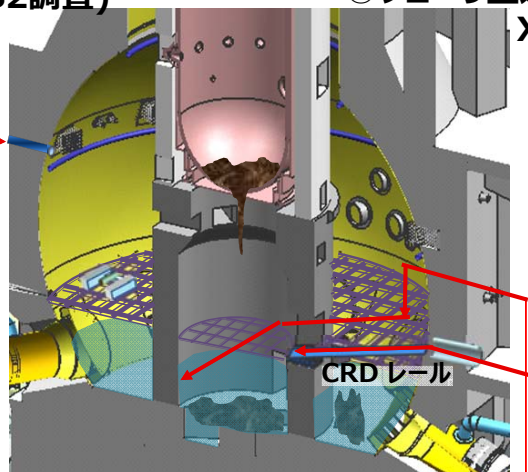
ペDESTル内側の調査（2号機）

○クローラ型遠隔調査ロボット（A2調査）

X-6ペネ



変形



ペDESTル内側の調査（3号機）



○水中遊泳型ロボット X-53ペネ

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

IRID

PCV内部のロボットによる調査 技術的課題の例

■ 高線量率環境への対応

- ~数十 Gy/h, 累積線量~数百 Gy
- 耐放射線性の高い電子機器、測定器、カメラの採用
- 照射試験による確認、測定誤差の検証

■ PCVバウンダリの確保

- ロボットサイズ < 貫通口径（走破性、搭載機器制約）
- 隔離弁の追設、シール機構、窒素加圧管理
- チャンバー内にユニット化されたケーブル送り機構、ロボット
- 現地施工の取合い、PCV外装置設置エリア作業線量率の低減

■ ケーブル、ケーブルマネジメント

- 乱巻の抑制、干渉物の回避、ロボット放置時の処置
- ケーブル重量<ロボットのけん引力（調査範囲を制約）
- ケーブルサイズ・特性 [動力、制御、通信]（搭載機器を制約）

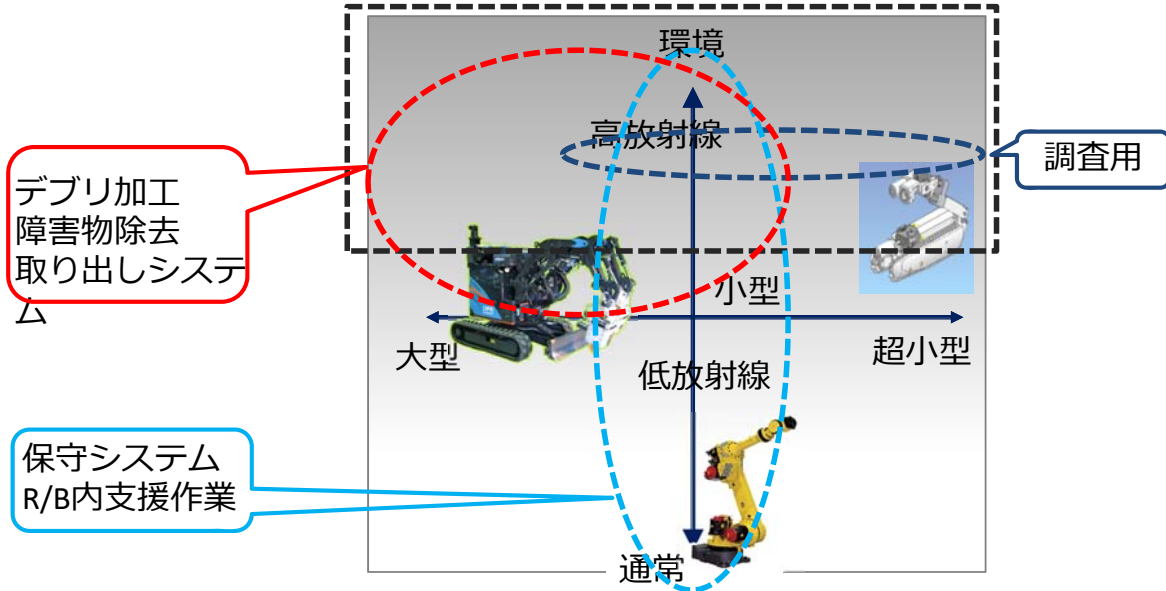
■ オペレーション

- （損傷）環境に応じた走破性
- 自己位置の確認方法、俯瞰カメラ、後部カメラ、ランドマークの活用
- 徹底した訓練、実機モックアップ試験

IRID

IRIDのロボット開発

- 今までは、炉内調査のため、超小型ロボットを開発してきた。今後は重作業のできる大型ロボット
- 重要機能：耐放射線性、保守性、環境に応じた駆動方式



本日の構成

■ 廃炉措置計画

「デブリ」って何？ PCV内部調査方針 IRIDのロボット開発

■ 燃料デブリ取り出し工法

気中-上アクセス工法 & 横アクセス工法 収納・移送・保管技術

■ 安全要求

デブリ取り出し時の安全要求 横アクセス工法の安全系

■ 廃炉ロボットの課題

IRIDの概要 廃炉技術の構成分野 設計上の課題

■ 学協会への期待

(引用)化学工学会からの「学協会連携への期待」 君に何を期待するか

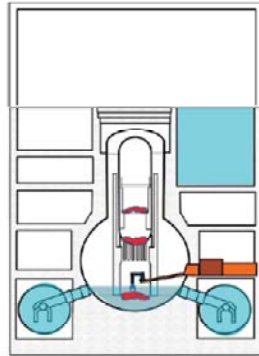
燃料デブリ取り出し工法

取り出し工法（3工法）における前提条件（仮定）

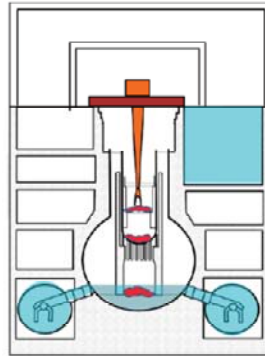
■ 残存する構造物は極力活用する

TAF : Top of Active Fuel (有効燃料頂部)

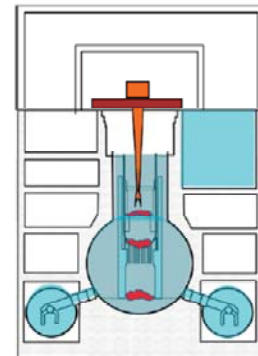
項目	気中-横 アクセス工法	気中-上 アクセス工法	冠水-上 アクセス工法
D/W水位	トラス室天井面レベル以下		TAF以上
PCV上部補修	なし（現状程度の開口）		あり
RPVヘッドの開放有無	開放なし		開放
取り出しセルの設置フロア	1階		オペフロ



気中-横アクセス工法



気中-上アクセス工法



冠水-上アクセス工法

デブリ取り出し工法

技術的課題

- **放射性ダストの閉じ込め**機能の確保
- **遠隔操作**技術の確立
- **被ばく低減・汚染拡大防止**技術の確立

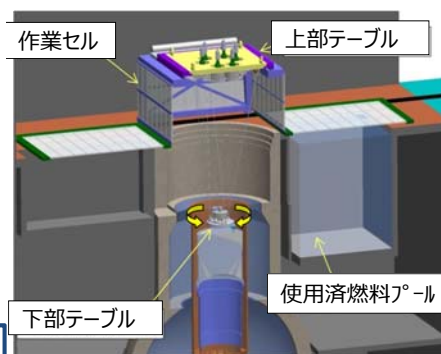
開発目的

- 主要3工法について、概念検討及び工法詳細ステップ図を作成し、基盤技術開発の成果と合わせ、**工法実現性の評価**を行う。

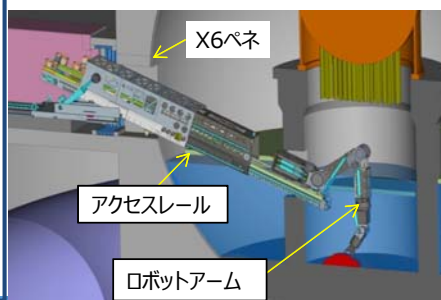
開発期間

2015.9~2017.3

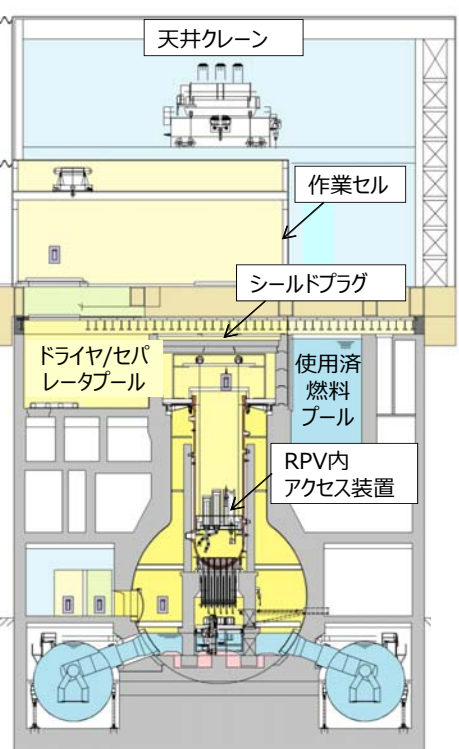
冠水-上アクセス工法（概念）



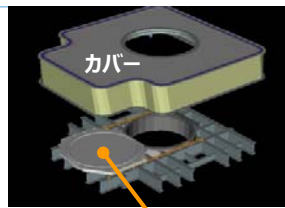
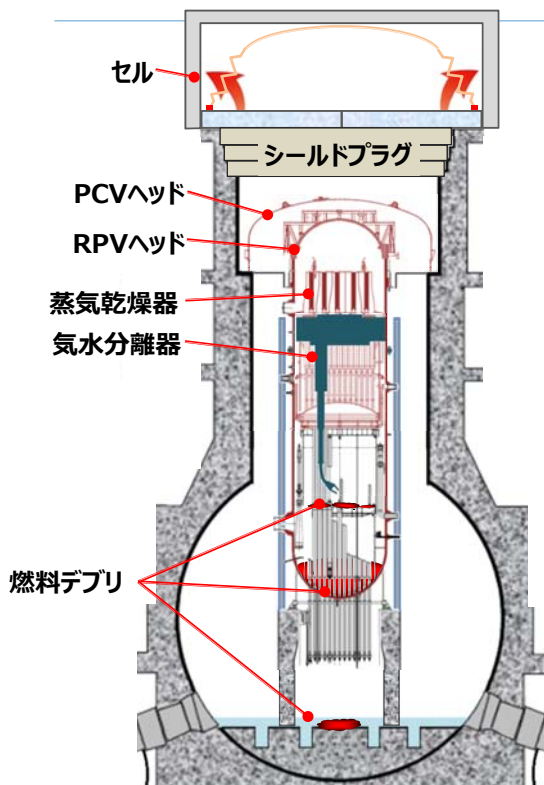
気中-横アクセス工法（概念）



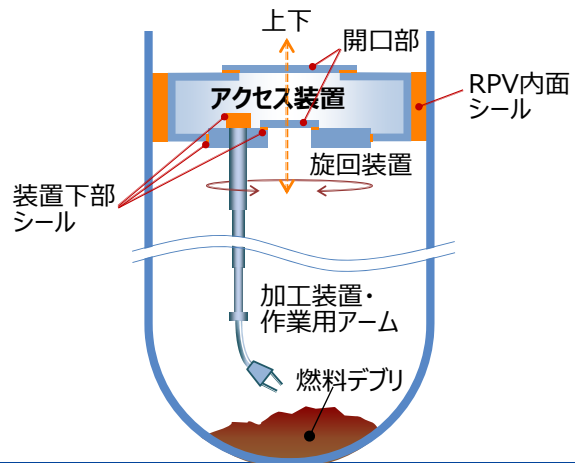
気中-上アクセス工法（概念）



気中-上アクセス工法(イメージ)



RPV内アクセス装置 (イメージ)

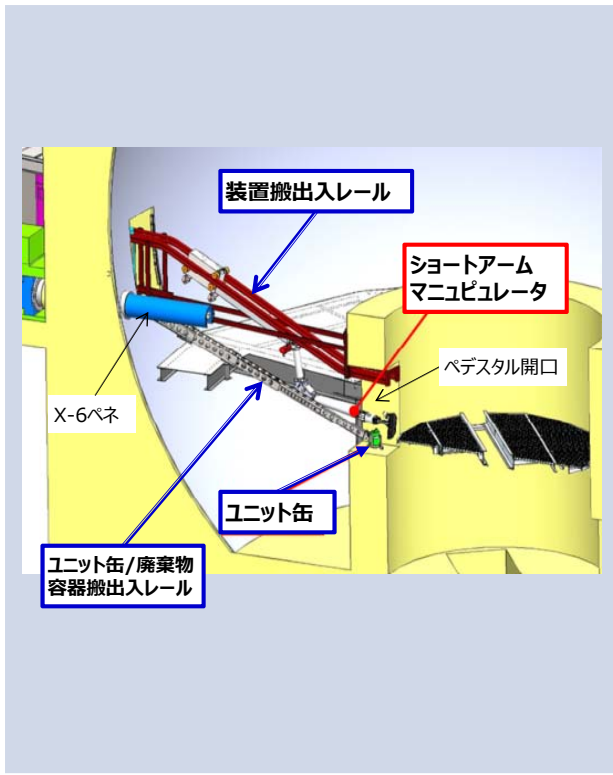


デブリ取り出し：横アクセス工法～デブリ搬出ルート

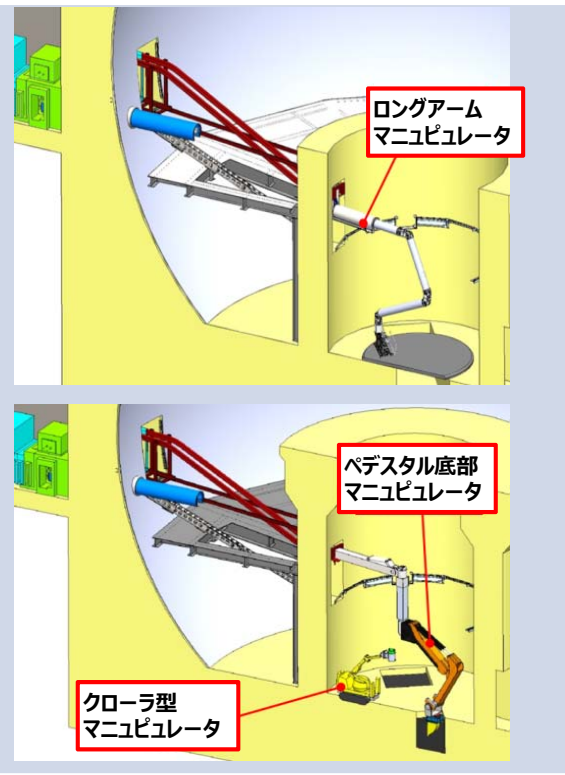
号機	1号機	2 / 3号機
配置の基本的な考え方	<ul style="list-style-type: none"> 比較的アクセスのしやすいPCV西側を使用して、デブリの搬出は「機器ハッチ」から。 	<ul style="list-style-type: none"> 比較的アクセスのしやすいPCV西側を使用して、デブリの搬出は「X-6ペネ」から。
配置計画	<p>PLAN-A</p> <p>デブリはR/B外壁を開口して搬出</p> <p>※ 本図はアクセスレール方式の場合の配置</p> <p>燃料デブリ搬出建屋 外壁を開口 原子炉建屋 機器ハッチ</p> <ol style="list-style-type: none"> 燃料デブリ取り出しセル 保守セル 搬出入セル 収納缶セル キャスクセル 	<p>燃料デブリ搬出建屋 外壁を開口 原子炉建屋 X-6ペネ ベドスタ</p> <p>※ 本図はアクセスレール方式の場合の配置</p> <ol style="list-style-type: none"> 燃料デブリ取り出しセル 保守セル 搬出入セル 収納缶セル キャスクセル
	<p>PLAN-B</p> <p>デブリはR/B大物搬入口から搬出</p> <p>大物搬入口</p>	<p>大物搬入口</p>

【PLAN-B】PCV新開口方式

ペDESTル内**落下物**の回収（イメージ）



ペDESTル内**デブリ**の回収（イメージ）



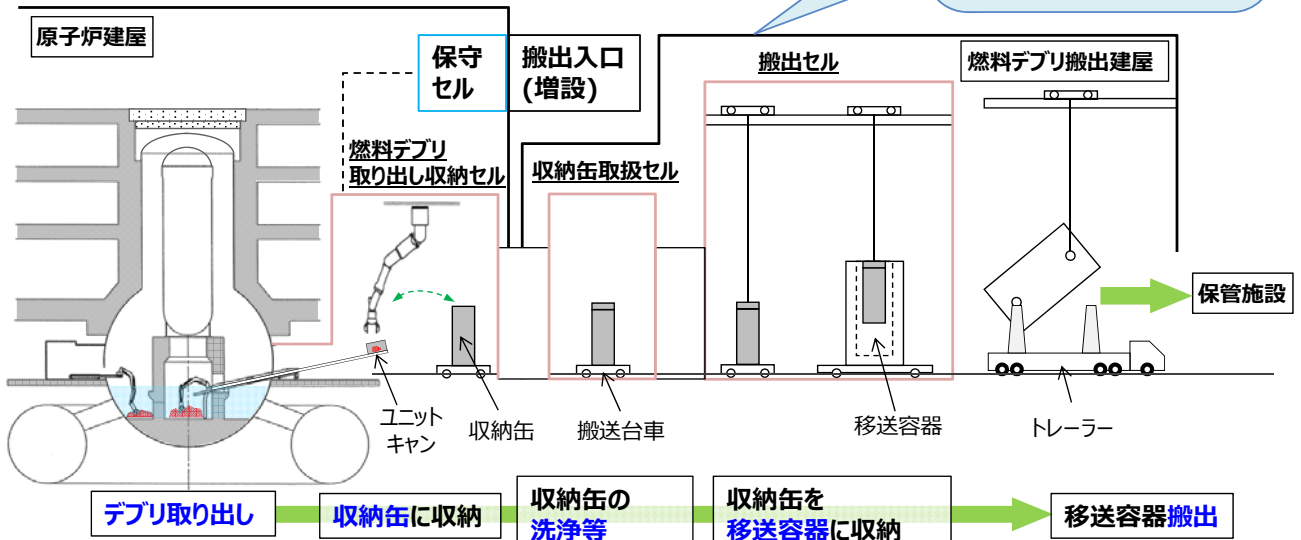
収納・移送・保管技術

収納缶の設計

- 燃焼度と濃縮度が高い→**反応度高**
- コンクリートとの熔融生成物→コンクリート中の水分の放射線分解による**水素発生**
- 海水注入、計装ケーブル他との熔融→**塩分**の影響、**不純物**の混入

- 多数の自動機
- 遠隔制御・自動制御のマニピュレータ
- セル間の分離・結合
- 洗浄
- 機器の点検・保守

移送方法（**気中-横アクセス工法**の場合：例）



本日の構成

■ 廃炉措置計画

「デブリ」って何？ PCV内部調査方針 IRIDのロボット開発

■ 燃料デブリ取り出し工法

気中-上アクセス工法 & 横アクセス工法 収納・移送・保管技術

■ 安全要求

デブリ取り出し時の安全要求 横アクセス工法の安全系

■ 廃炉ロボットの課題

IRIDの概要 廃炉技術の構成分野 設計上の課題

■ 学協会への期待

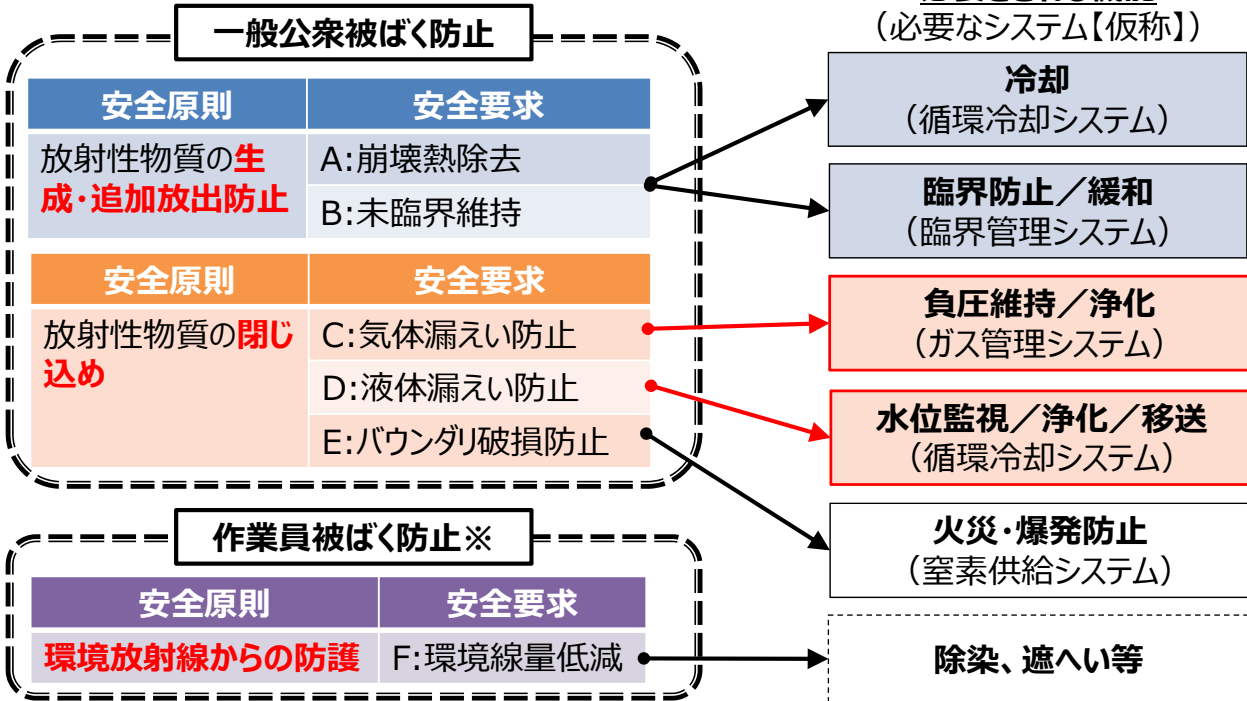
(引用)化学工学会からの「学協会連携への期待」 君に何を期待するか

デブリ取り出し時の安全要求 (原子力安全→安全要求)

原子力安全	安全原則 (達成されるべきもの)		基本安全機能 (防護されるべきもの)	安全要求 (維持されるべきもの)	
人と環境を放射線リスクから防護する	放射性物質の大規模な放出防止 (一般公衆被ばくの防止)	放射性物質の閉じ込め	バウンダリによる閉じ込め	(動的閉じ込め) C: 気体漏えい防止	放射性物質の閉じ込め <ul style="list-style-type: none"> (動的閉じ込め) <ul style="list-style-type: none"> C: 気体漏えい防止 D: 液体漏えい防止 (静的閉じ込め) <ul style="list-style-type: none"> E: バウンダリ破損防止
				(動的閉じ込め) D: 液体漏えい防止	
				(静的閉じ込め) E: バウンダリ破損防止	
	放射性物質の生成・追加放出防止	臨界管理 冷却管理	B: 未臨界維持	放射性物質の生成・追加放出防止 <ul style="list-style-type: none"> (生成防止) <ul style="list-style-type: none"> B: 未臨界維持 (追加放出防止) <ul style="list-style-type: none"> A: 崩壊熱除去 	
A: 崩壊熱除去					
廃炉作業に伴う環境放射線からの防護 (作業員被ばくの防止)	放射線管理		F: 環境線量低減	作業中の環境放射線からの防護 <ul style="list-style-type: none"> F: 環境線量低減 	

デブリ取り出し時の安全要求 (安全要求→機能要求)

必要とされる機能
(必要なシステム【仮称】)

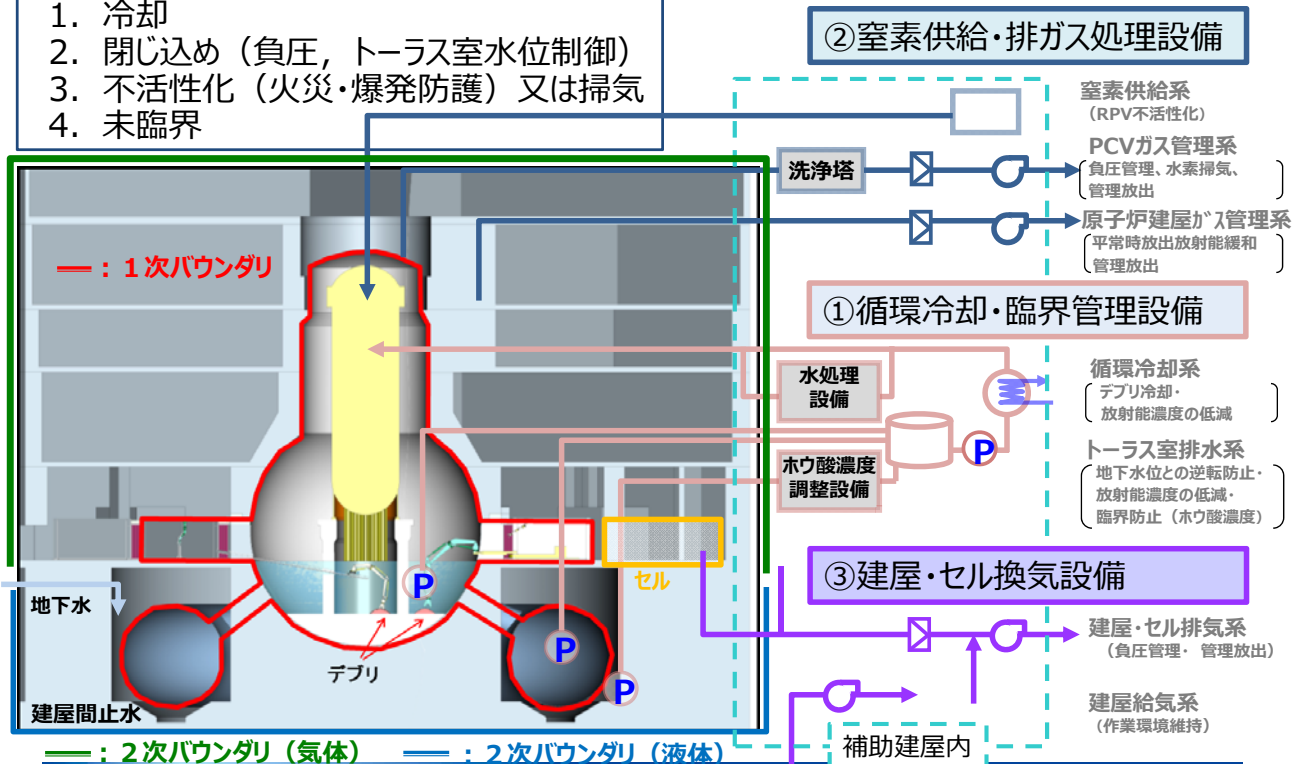


※デブリ取り出し・廃炉作業。事故時の作業員（敷地内）被ばくは一般公衆に準じ評価していく。

気中－横アクセス工法の概念設計状況 安全系システム

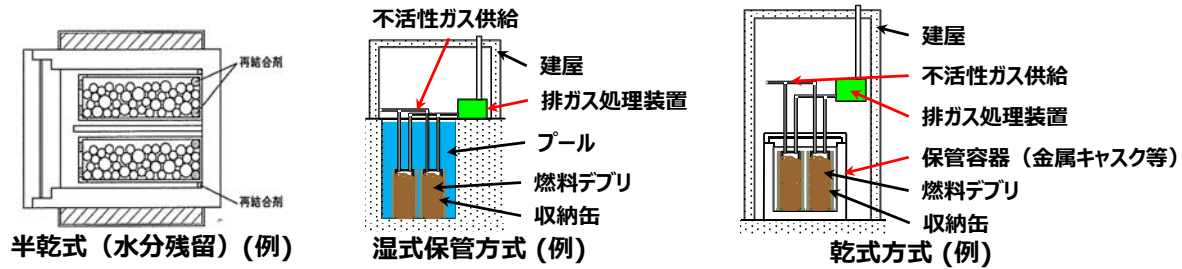
必要な安全機能

1. 冷却
2. 閉じ込め（負圧，トラス室水位制御）
3. 不活性化（火災・爆発防護）又は掃気
4. 未臨界



移送・保管システムへの要求事項の検討例

収納缶を移送・保管時に必要となる移送容器及び保管施設への要求機能（案）



主要項目	要求機能	課題	
移送容器	未臨界	移送容器内で収納缶の配置を規定すること	収納缶内のデブリの放出による影響設定（収納缶設計で検討）
	除熱	燃料デブリを冷却できること	なし（デブリは使用済燃料と同等以下の発熱量であり、自然冷却可能）
	遮蔽	必要な遮蔽板厚を有すること	なし（移送カスクに適切な板厚設定をすれば問題なし）
	閉じ込め	放射性物質が密封可能であること	なしの見込み（2重蓋構造で対応可能な見込み）
	構造/材料	取扱時に構造健全性が維持されること	移送時の時間制限／移送容器内の触媒設置等（収納缶設計で検討）
保管施設（湿式/乾式）	未臨界	通常時/事故時に未臨界性を維持すること	（湿式のみ）プール水喪失事故時の未臨界性維持可能な保管施設の検討
	除熱	燃料デブリを冷却できること	なし（建屋換気またはプール水、貯蔵容器内での自然冷却は可能）
	遮蔽	必要な遮蔽板厚を有すること	なし（プール内保管または移送カスクに適切な板厚設定をすれば問題なし）
	閉じ込め	放射性物質が密封可能であること	なしの見込み（建屋のシステム構成は既存プラントで実績あり。貯蔵カスクは2重蓋構造で対応可能な見込み）
	構造/材料	貯蔵時に構造健全性が維持されること。	なしの見込み（建屋側に排ガス処理装置を設けることで対応可能 なお、乾燥処置が課題なる可能性がある。（デブリ性状PJによる要素試験結果で判断する。））
	構造/材料	貯蔵時に構造健全性が維持されること。	なしの見込み（建屋（プール）側に水処理装置を設けることで対応可能）

IRID

27

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning



本日の構成

■ 廃炉措置計画

「デブリ」って何？ PCV内部調査方針 IRIDのロボット開発

■ 燃料デブリ取り出し工法

気中-上アクセス工法 & 横アクセス工法 収納・移送・保管技術

■ 安全要求

デブリ取り出し時の安全要求 横アクセス工法の安全系

■ 廃炉ロボットの課題

IRIDの概要 廃炉技術の構成分野 設計上の課題

■ 学協会への期待

(引用)化学工学会からの「学協会連携への期待」 君に何を期待するか

IRID

28

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

廃炉ロボットの課題

福島第一原子力発電所の事故対応

放射性物質によるリスクから人や環境を守る

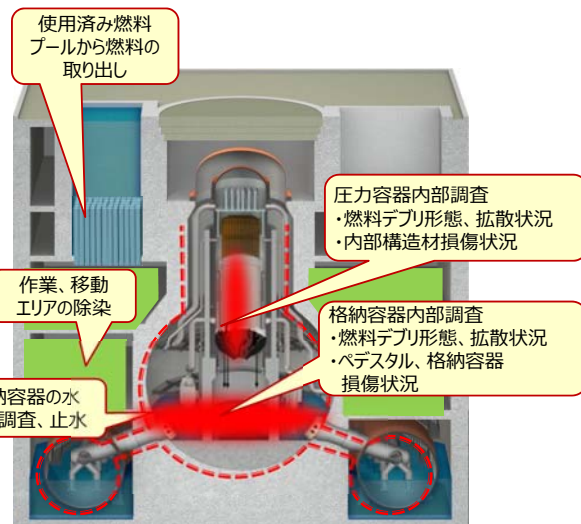
＜廃炉措置＞

- ・ 人が近づけない高放射線環境
- ・ 安全最優先で着実な調査や作業

→ **ロボット技術を活用した遠隔基盤技術**

＜課題の難しさ＞

- ・ 実際の内部状況が不明で手探りの状況
- ・ アクセスできる空間や使えるリソースの制約
- ・ あらゆる事態を想定した対処の検討
- ・ 進捗状況によって廃炉措置全体の構想の変化



- ・ 想定ベースの仕様設定
- ・ 高信頼な特注製品
- ・ 人間機械系の導入
- ・ 開発途中での仕様変更

原子炉建屋・作業エリアの除染

除染技術開発の課題

従事者の線量限度：1年間で50mSv、5年間で100mSv
作業エリア：3 mSv/h、アクセスルート：5 mSv/h

漏えい箇所調査、補修等の各種作業を円滑に進めるためには、作業場所の環境改善が必要

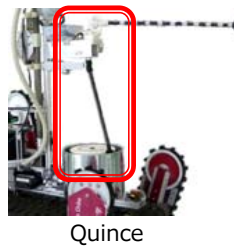
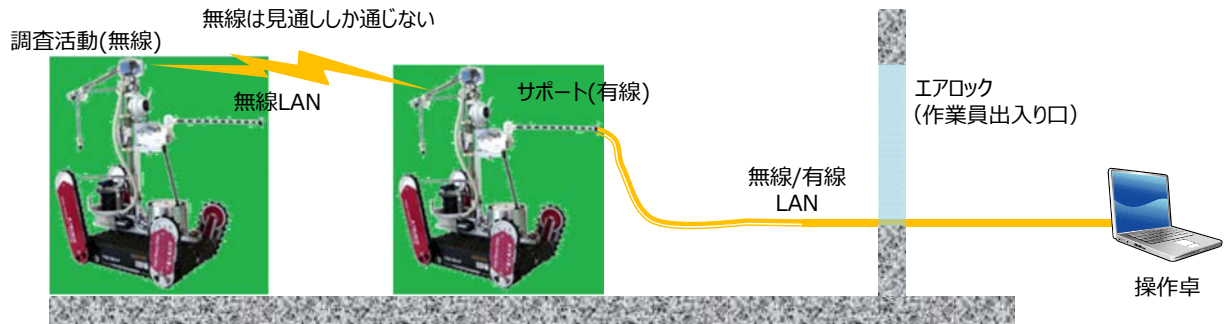
課題

- 高線量エリアでの作業 ⇒ 遠隔技術の確立
- 多様な汚染形態／多様な作業場所への対応要 ⇒ 対象部位ごとの仕様検討・開発

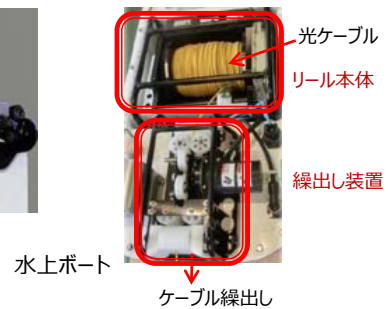
1～3号機の放射線量状況 2014年～2015年調査



遠隔制御



移動中に配線がからまる、切れるなどを回避する、配線の「繰り出し／巻き取り機構」が必要



千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター(fuRo) <http://www.furo.org/>
 千葉工業大学、東北大学、国際レスキューシステム研究機構プロジェクトチーム「Quinceによる福島原発対応」2011.6.8

IRIDの概要

【理 念】 将来の廃炉技術の基盤強化を視野に、**当面の緊急課題である福島第一原子力発電所の廃炉に向けた**技術の研究開発に全力を尽くす。

■ 名 称 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (略称: IRID「アイリッド」)
 (International Research Institute for Nuclear Decommissioning)

■ 設 立 2013年8月1日 (認可)

オールジャパン体制

- 組合員 構成員: 953名 (2017年10月1日現在、役員を除く)
- 国立研究開発法人: 2 法人
 日本原子力研究開発機構 (JAEA)、産業技術総合研究所 (AIST)
 - メーカー等: 4 社
 東芝エネルギーシステムズ(株)、日立GE ニュークリア・エナジー(株)、三菱重工業(株)、(株)アトックス
 - 電力会社等: 12 社
 北海道電力(株)、東北電力(株)、東京電力(株)、中部電力(株)、北陸電力(株)、関西電力(株)、中国電力(株)、四国電力(株)、九州電力(株)、日本原子力発電(株)、電源開発(株)、日本原燃(株)

■ 事業費

年度	2013年度 (8月~)	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度
事業費	約45億円	約120億円	約158億円	約141億円	約178億円

IRIDの研究開発プロジェクト

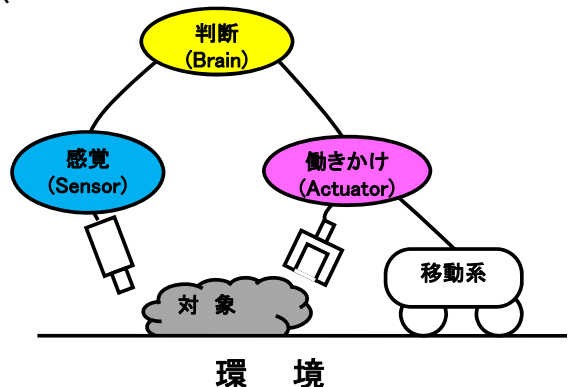


ロボットの設計

- 環境：高放射線、高温多湿、塵埃
 未知、特性不明、光なし&地図なし、
- 対象：物理特性不明、臨界、デブリの判別

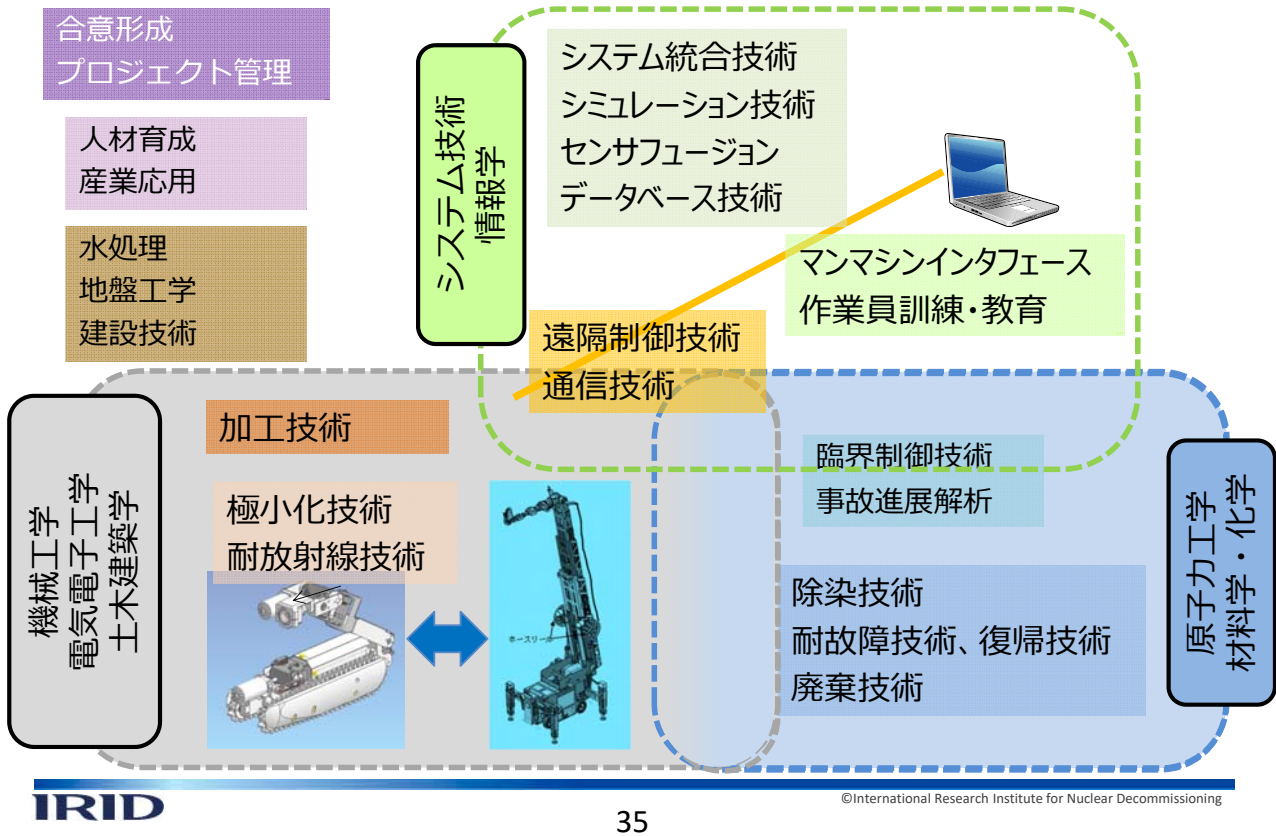
■ Sensor-Brain-Actuator+Mobilityの組合せ

- **Sensor: 電子機器の耐放性**
- **Brain: 人による判断**
 - 作業員訓練
 - 判断基準の構築
 - システムによる部分サポート
- **Actuator: 作業依存で多数の機器**
 - 手先繰返し位置決め精度、固有振動数
 - 反力の受け、手先交換
- **Mobility: 大型(40m程度)、水中&空中**
 - 高温多湿、塵埃環境
 - 大型・重量機器の制御性(必要時間、速度)
 - 保守のための出入り

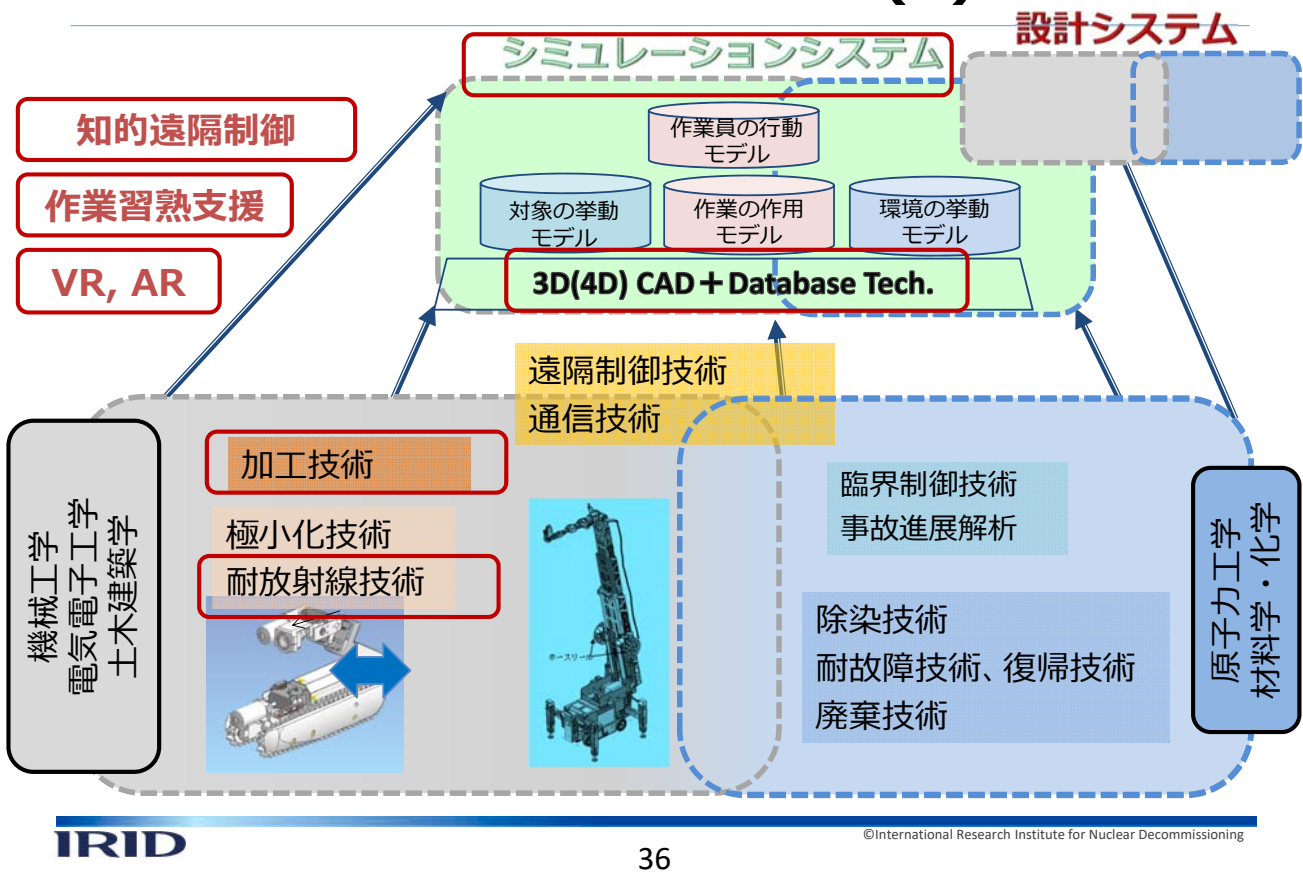


環境の制御
 移動能力構築
 作業能力構築
 保守方法の確立

廃炉技術の構成分野(1)



廃炉技術の構成分野(2)



設計上の課題

開発上の課題

- 大型機器ゆえ、長期の開発期間
- 原子力関連の安全管理
- 有限な開発期間

内部調査と作業実績で積み重ね

- 調査結果をデータベースとして構築
- 設計経験の集積
- シミュレーション技術の確保

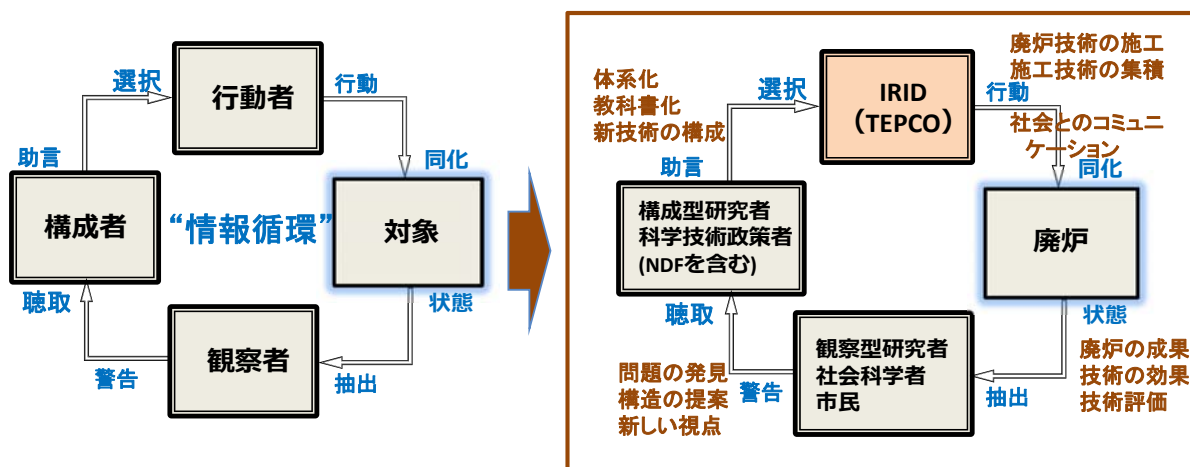
目標を絞り込み、状況を多様に想定

- 想定状況を広げて、複数設計候補を検討
- 専門家によるデザイン・レビュー(既に120回)
- プロジェクト間の連携を強化、基礎技術を抽出して検討
- 手戻りがあった場合に、迅速に対応できる体制
- リスクアセスメントの強化

設計仕様が不確定

- 内部状態が不明で、状態を想定、作業を想定
- 測定対象の特性が不明。センサの選択が困難
- 炉内部の物質を外部に持ち出しにくい
- 調査段階では、超小型機器が必要

ある対象が持続的進化をするための基本構造



2016年7月19日 日本学術会議 公開シンポジウム
 「知の統合を如何に達成するか～総合工学の方向性を探る」
 吉川弘之講演資料より引用、一部修正

本日の構成

■ 廃炉措置計画

「デブリ」って何？ PCV内部調査方針 IRIDのロボット開発

■ 燃料デブリ取り出し工法

気中-上アクセス工法 & 横アクセス工法 収納・移送・保管技術

■ 安全要求

デブリ取り出し時の安全要求 横アクセス工法の安全系

■ 廃炉ロボットの課題

IRIDの概要 廃炉技術の構成分野 設計上の課題

■ 学協会への期待

(引用)化学工学会からの「学協会連携への期待」 君に何を期待するか

国際廃炉研究開発機構 の情報発信

IRID 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構
International Research Institute for Nuclear Decommissioning

English

Google カスタム検索

組織概要 研究開発 公募調達 国際活動 委員会 人材育成 活動報告

TOP > 公表資料・プレスリリース

公表資料・プレスリリース

- > 2018年
- > 2017年
- > 2016年
- > 2015年
- > 2014年
- > 2013年

公表資料・プレスリリース

2018年

4月 1日 【お知らせ】 役員人事について (2018年4月1日) [PDF](#)

3月 29日 「廃棄物試料の分析結果 (水処理設備処理二次廃棄物・滞留水) (2018年3月29日 廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議 (第52回) 報告資料)」 [PDF](#)

3月 2日 「研究開発プロジェクトの進捗状況及び次期計画の方向性 (2018年3月1日 廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議 (第51回) 報告資料)」 [PDF](#) ※このうちIRID関係の資料はP18以降です (一部他組織も混在)。

「研究開発」ではプロジェクトでの詳細な開発内容を報告

「人材育成」では講演・シンポジウム・WSなどでPPTファイルを公開

東京電力による写真・動画データ

■ <http://www.tepco.co.jp/decommision/index-j.html>

➤ 「福島第一原子力発電所は、今」～あの日から、明日へ～ (ver.2017.6)

http://www.tepco.co.jp/tepconews/library/archive-j.html?video_uid=qz11vg7v&catid=61709

➤ 暗闇の水中で見たもの－福島第一原子力発電所3号機原子炉格納容器内部調査

http://www.tepco.co.jp/tepconews/library/archive-j.html?video_uid=qz11vg7v&catid=61709

記者会見・メッセージ	当社全般	福島復興の取り組み	廃炉への取り組み	新潟本社 柏崎刈羽	火力発電所
2017/07/27(木) 暗闇の水中で...	2017/7/13(木) 福島第一原子...	2017/6/28(水) 「福島第一原...	2017/04/27(木) 普通に働け...	2017/03/29(水) 調査用ロボ...	2017/03/09(木) 燃料デブリ...
<td><td></td></td>	<td></td>				

君に何を期待するか

■ 学生として、社会人として、

- 福島第1の状況を科学的に理解すること
- 技術の適用、失敗、そしてその後の対応を深く考えること
- 社会の技術としての科学技術を広範に眺める力を持つこと

■ 多分野複合技術の研究者として

- 自分の分野を他の分野から眺める経験を積むこと
- コミュニケーション能力を高める努力を常に継続すること
- 社会科学的視点を理解すること

■ 研究プロジェクトリーダーとして、

- 未踏分野の技術成功率は低いことを理解すること
- 失敗例を的確な情報として残すこと
- 部分最適化を避け、全体最適化を図ること

おわりに

廃炉は世代をまたいだ長期事業
理解し、記憶し、手助けしよう

国際廃炉研究開発機構への
ご支援をお願いします。

新井 民夫
tamio-arai@irid.or.jp